引用格式：熊志飞, 张文忠. 中国新能源汽车产业创新网络及其溢出效应研究. 中国科学院院刊, 2022, 37(12): 1819-1832.
Xiong Z F, Zhang W Z. Study on innovation networks and its spillover effect of China’s new energy automobile industry. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(12): 1819-1832. (in Chinese)

中国新能源汽车产业创新网络及其溢出效应研究

熊志飞[1]　张文忠[1,2,3*]

1 中国科学院地理科学与资源研究所 北京 100101
2 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室 北京 100101
3 中国科学院大学 资源与环境学院 北京 100049

摘要　知识的网络溢出效应在产业创新发展中的作用日益显著。文章以中国新能源汽车产业的创新活动为研究对象，基于新能源汽车专利数据构建中国新能源汽车产业的城市合作矩阵，并分析了中国新能源汽车产业创新网络的结构及其演化过程。在此基础上，运用空间杜宾模型计算了新能源汽车产业基于创新网络关系的溢出效应，并将结果与基于城市距离关系与邻接关系的溢出效应的结果进行对比。结果表示：（1）中国新能源汽车产业的创新活动已初具规模，并形成了一定规模的创新网络，但城市间、企业间的创新合作关系并不密切；（2）新能源汽车的创新活动主要集中于规模较大的城市中，并且此类城市拥有更强的辐射带动能力；（3）企业的研究与试验发展（R&D）经费投入是推动当地新能源汽车产业创新发展的核心动力，但整体上并未产生显著的溢出效应。

关键词　新能源汽车产业，创新网络，溢出效应，空间杜宾模型

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20220922001

在过去的几十年中，新能源汽车产业已经通过汽车企业间的合作在全球创新系统中形成了庞大的综合知识库[1]。中国作为新能源汽车产业创新研究的典型地区[2-4]，其新能源汽车产业的创新发展处于何种发展阶段？是否形成了复杂的创新网络，并通过创新网络的溢出效应推动了整体的创新发展？目前，关于以上问题的研究相对较少，本文尝试重点对以上问题进行分析探讨。

创新活动在不同尺度下产生的知识共享、匹配和溢出的现象是目前创新研究的核心内容[5]；并且，随

*通信作者
资助项目：中国科学院美丽中国生态文明建设科技工程专项（XDA23100302）
修改稿收到日期：2022年12月1日

着流空间和网络等概念的提出[6]，网络外部性——即知识在网络结构中的溢出效应与集聚外部性共同成为刻画空间溢出效应的核心概念[7]。但受新能源汽车发展较晚的影响，国内对于新能源汽车产业创新网络的相关研究相对较少，仅有少量研究对其网络结构进行了相关分析[4,8,9]，其发展中的溢出效应更鲜有涉及。同时，在中国近10年的新能源汽车产业快速发展中，以比亚迪、蔚来、小鹏等为代表的自主新能源汽车品牌企业逐渐占据了新能源汽车市场，冲击了传统以国有汽车企业为主导的汽车市场；并且，作为具有高技术门槛的产业，新能源汽车产业可能具有不同于传统汽车制造业的创新发展模式。

据此，本研究选取中国新能源汽车产业的创新活动作为研究对象，主要对两个方面展开分析：① 基于新能源汽车专利数据，利用社会网络分析方法，构建2011—2020年这10年来中国新能源汽车产业的城市合作矩阵，识别其创新网络结构及演化过程；② 基于创新网络中的城市合作关系，通过空间杜宾模型计算其网络溢出效应，并与基于城市的邻接关系和距离关系的溢出效应对比，以期为中国新能源汽车产业的发展模式提供更丰富的实证证据与发展建议。

1 新能源汽车产业创新网络空间结构分析

1.1 新能源汽车产业创新网络数据及方法

本研究数据源自"专利汇"①专利情报服务平台。新能源汽车是指采用非常规动力来源的汽车，因此基于已有研究[4,8]，本研究以"纯电动""新能源""混合动力""氢动力"和"燃料汽车"为检索字段进行专利检索；同时，考虑到我国新能源汽车产业的快速发展主要集中于近10年内，且用于计算溢出效应的相关统计数据仅更新至2020年，本研究筛选了专利公布日位于2011—2020年的国内有效专利数据，并剔除完全由个人提出申请的专利数据，共计获得24 957条新能源汽车有效专利数据，其中完全由企业、高校和科研机构完成的合作专利数据共计2 328条。在此基础上，利用"爱企查"②企业信息垂直搜索引擎与展示平台逐条获取各专利申请单位的地理位置——当该专利的申请企业、高校和科研机构的地理位置位于两个不同城市时，则记这两个城市间存在1次合作关系，如果存在三个或三个以上城市，则两两之间记1次合作关系，进而构建中国新能源汽车产业创新网络。

本研究基于社会网络分析方法，利用多项相关指标计算了中国新能源汽车产业创新网络的整体和节点特征。在对创新网络的整体特征计算中，结网比例指合作专利占全部专利的比例；平均度指创新网络中各节点的合作节点数量的平均值；网络密度指创新网络中各节点直接的合作密切程度；平均距离指创新网络中任意两节点之间产生合作联系的平均距离；平均聚类系数则是在平均距离的基础上，测算了网络中与同一节点相连的两个节点间建立联系的平均概率。在对创新网络的具体节点特征的计算中，节点中心度指与某一结点有合作关系的节点数量；接近中心度指某一结点到其他所有与之有合作关系的节点平均距离的倒数；中介中心度指某一结点到与之有合作关系的节点的最短路径的数量（详见附录1）。

1.2 新能源汽车产业创新网络总体特征

中国新能源汽车产业创新能力不断提升，但合作创新相对较少。由表1可知，自2011年以来，中国新能源汽车产业相关获批专利数量逐年递增；尤其在2015年后，中国新能源汽车产业进入快速发展时期，每年获批专利数较前一年均增长在600件以上，可见中国新能源汽车产业创新能力在逐年提升。相反，结网比例虽然于2014年达到最大值22.57%，相较往年有所提升，但整体上仍呈现逐年下降的趋

① https://www.patenthub.cn.
② https://aiqicha.baidu.com.

势，至2020年，结网比例仅为10.98%。这反映出自2011年以来，尽管中国新能源汽车产业获批的合作专利数量同专利总数同样呈增长趋势，但更多的专利由企业独立完成申请，合作专利数量的增速远低于专利总数的增速。

*参与到中国新能源汽车产业创新网络中的城市逐年增多，但城市之间的合作主要集中在部分城市。*平均度自2011年以来逐年上升，至2018年到最大值后开始降低。这反映出随着中国新能源汽车产业的发展，以及参与其生产创新的企业和城市逐渐增多，城市之间的合作对象也逐渐丰富。但受国内新能源汽车补贴政策进一步退坡影响，2019年中国新能源汽车产销量首次出现下降的情况，新能源汽车企业相应地减少了企业间的专利合作，同时2020年受疫情的影响，城市间合作成本提升，因此2019年后平均度出现显著下降。而网络密度则表现出逐年下降的趋势，虽然更多的城市参与到中国新能源汽车产业创新网络中，但新参与的城市与其他城市的合作并不密切，仅和少数特定的城市开展了新能源汽车的专利合作。

平均距离和平均聚类系数的变化趋势进一步解释了自2011年以来网络密度逐年下降的现象。随着中国新能源汽车产业创新网络中参与城市逐渐增多，其平均距离在2014年后稳定在2.2—2.4，而平均聚类系数虽然2017年仅有5.089，但整体呈上升趋势。这反映出中国新能源汽车创新网络中小世界网络特征逐渐凸显，即新能源汽车专利合作往往集中于特定的两个或几个城市间，而不是随机出现。

1.3 新能源汽车产业创新网络节点特征

*中国新能源汽车产业的创新活动主要集中在三大城市群与其他直辖市、省会城市和首府城市。*由图1可知，中国新能源汽车产业有效专利的申请企业主要集中分布在北京市和长江三角洲城市群地区，此外粤港澳大湾区、重庆市、成都市、武汉市、郑州市等地区也有少量分布。这反映了中国新能源汽车研发企业和科研机构集中的地理位置。例如，北京市拥有清华大学、北京理工大学、中国科学院下属各类研究

表1　2011—2020年中国新能源汽车产业创新网络整体指标变化趋势

Table 1　Trend of innovation networks of China's new energy automobile industry index from 2011 to 2020

年份	专利总数（件）	结网比例（%）	平均度	网络密度	平均距离	平均聚类系数*
2011年	202	18.32	1.000	1.000	1.0	-
2012年	422	15.88	1.000	0.200	1.0	-
2013年	803	15.94	2.000	0.286	1.9	3.067
2014年	997	22.57	2.586	0.092	2.3	5.862
2015年	1 356	19.25	2.207	0.079	2.2	6.339
2016年	1 979	16.68	3.032	0.101	2.2	9.953
2017年	2 539	14.81	3.447	0.093	2.2	5.089
2018年	4 187	12.90	3.979	0.085	2.4	8.711
2019年	5 160	11.72	3.529	0.071	2.3	8.117
2020年	7 312	10.98	2.347	0.032	2.4	9.500

* 2011年和2012年参与中国新能源汽车产业创新网络的城市数量较少，未满足平均聚类系数的网络节点最小数量要求，无平均聚类系数，用“-”表示

* Cities in innovation network of China's new energy automobile industry in 2011 and 2012 are too few to meet the minimum number of average cluster coefficient which was represented by “-”

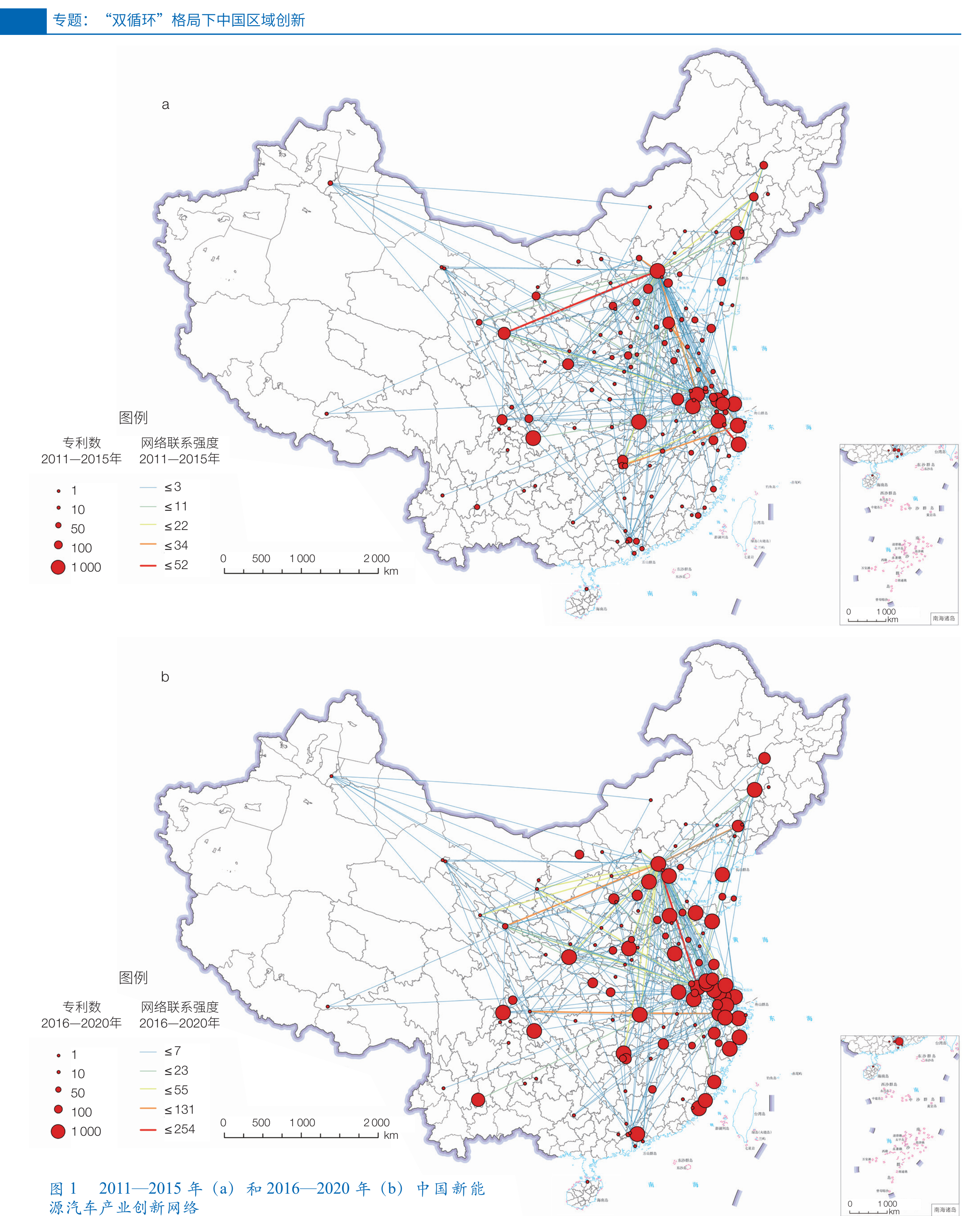


图 1 2011—2015 年（a）和 2016—2020 年（b）中国新能源汽车产业创新网络

Figure 1 Innovation networks of new energy automobile industry in China from 2011 to 2015 (a) and 2016 to 2020 (b)

本研究所使用专利搜索平台中港澳台地区专利数据暂缺

Due to lack of data, Hong Kong SAR, Macao SAR, and Taiwan Province of China are not included in this study

所，以及北汽集团和国家电网有限公司；长江三角洲城市群拥有（上海）上海交通大学、上汽集团，（浙江）浙江大学、吉利汽车集团，（江苏）东南大学、南京理工大学、国电南瑞科技有限公司，以及（安徽）合肥工业大学、江淮汽车集团、奇瑞汽车集团等新能源汽车研发单位。

北京市、上海市和其他省会城市、首府城市是中国新能源汽车产业创新网络中的核心节点，并具有引导其他城市共同开展新能源汽车专利合作的能力。由表2可知，北京市节点中心度自2011年以来始终是中国新能源汽车产业创新网络中各城市的最高值，并且远高于其他城市。这反映出北京市不仅在数量上拥有最多的新能源汽车产业专利，同时相对于其他城市，还与创新网络中更多其他的节点城市开展了新能源汽车的创新合作。北京市在中介中心度上自2011年以来也保持着远高于其他节点城市的数值。这反映了在新能源汽车产业创新网络中，北京市拥有远高于其他城市的在联合其他两个及两个以上城市共同开展研发活动的能力。上海市的节点中心度和中介中心度自2011年以来上升显著。同时，杭州市和南京市等其他长江三角洲城市群地区的城市也具有较高的节点中心度和中介中心度。结合图1可知，在长江三角洲城市群地区，上海市同其他城市已经形成了复杂的新能源汽车产业创新网络，同样具有联合其他两个及两个以上城市共同开展研发活动的能力。此外，相较于2011—2015年，2016—2020年的节点中心度和中介中心度排名前10名的城市中省会城市和首府城市显著增多，这是由于省会城市和首府城市在省内和自治区内通常拥有更多的政策倾斜和更为丰富的企业、科研资源。随着参与到中国新能源汽车产业创新网络中的城市逐渐增多，省会城市和首府城市更有能力与率先开展新能源汽车研发的城市开展合作，或者自主开展并引导其他邻近城市参与新能源汽车的研发活动。

综上，随着中国新能源汽车产业的发展，其创新网络已初具规模，并有快速增长的趋势；但整体上，城市间的合作并不密切，随着参与创新网络的城市增多，部分直辖市、省会城市和首府城市凭借其经济和政策上的优势，使得创新网络中小世界网络特征更加

表2　2011—2020年新能源汽车产业创新网络节点指标前10位城市

Table 2　Top ten cities in node index of China’s new energy automobile industry innovation networks from 2011 to 2020

排序	2011—2015年						2016—2020年					
	节点中心度		接近中心度		中介中心度		节点中心度		接近中心度		中介中心度	
	城市	值	城市	值	城市	值	城市	值	城市	值	城市	值
1	北京市	195	重庆市	332	北京市	370.00	北京市	955	龙岩市	264	北京市	1 416.80
2	杭州市	98	台州市	327	南京市	87.50	南京市	496	唐山市	262	杭州市	423.85
3	兰州市	82	滁州市	324	杭州市	55.50	兰州市	218	佛山市	257	南京市	419.81
4	宁波市	79	宁波市	324	上海市	29.00	杭州市	185	眉山市	257	上海市	243.69
5	济南市	69	湘潭市	324	济南市	27.00	银川市	93	珠海市	254	西安市	121.71
6	南京市	68	盐城市	323	张家口市	2.50	西安市	92	潍坊市	243	兰州市	102.00
7	湘潭市	67	镇江市	323	兰州市	2.00	南充市	80	金华市	238	武汉市	96.75
8	台州市	52	合肥市	306	保定市	0.50	上海市	78	开封市	238	成都市	77.78
9	保定市	28	湖州市	306	西安市	0.50	武汉市	62	台州市	238	长沙市	74.67
10	长春市	26	西宁市	306	长春市	0.50	济南市	54	南充市	237	宁波市	74.25

显著。其中，北京市是中国新能源汽车创新网络的核心节点，同时其也具有较强地推动其他城市开展新能源汽车研发合作的能力。

2 新能源汽车产业创新网络溢出效应

2.1 新能源汽车产业溢出效应特征

溢出效应反映了经济活动中产生的外部性[10]，其中集聚外部性[11]和网络外部性[7]从两种角度解释了在创新活动中的溢出效应。前者强调了知识在传播过程中的距离成本——更加邻近的区位往往更利于企业间知识的共享、匹配与学习[12]；尤其是在交通条件相对较差的环境下，距离对知识在空间中溢出的影响则更为显著。后者则认为随着生产网络的不断扩张，产业集群的跨区域合作愈发明显——不同区域的创新动力不仅取决于其自身的内生要素，更受到了其在多个尺度下生产网络中的分工协作的影响。而随着产学研一体化的推进，在企业之外的高校和科研机构也开始参与到创新活动中。因此，创新活动的溢出效应不仅局限在纵向产业链上的各企业间，同时也存在于横向企业与高校和科研机构之间的知识链上[13]。

新能源汽车产业作为新兴的高技术门槛产业，其产业链涉及多种不同类型的企业间，高校和科研机构之间，以及企业与高校、科研机构之间的研发与合作。从新能源汽车产业创新网络中的合作关系来看：① 新能源汽车产业中的合作一部分是新能源汽车企业与相关高校、科研机构间的合作。在中国新能源汽车产业发展初期，新能源汽车技术研发能力主要集中于高校和科研机构中，新兴的新能源汽车企业必须依托于政府的政策支持，通过与科研机构开展合作来进行新能源汽车技术创新。但是，新能源汽车企业与拥有新能源汽车研发能力的高校和科研机构在空间分布上并不完全耦合，因此容易形成跨区域的城市合作关系。② 新能源汽车产业中的合作另一部分则是新能源汽车企业间的合作。随着新能源汽车产业的发展，更多体量较大的汽车企业参与到该领域的研发活动中，此类汽车企业拥有充足的科研资金自发进行新能源汽车技术的研发。为了降低生产成本，企业通过内部分工，将不同产品的生产及相应的创新部门从企业内部划分至其他城市进行生产及研发，或者单独将研发部门划分至创新环境更好的城市，进而形成跨城市的合作关系。知识也通过以上两种方式形成了网络溢出效应。

2.2 空间自相关分析

中国新能源汽车产业有效专利在城市间存在一定的空间集聚现象，并且集聚程度有上升趋势。由表 3 可知，2011—2015 年和 2016—2020 年中国新能源汽车专利的全局莫兰指数均通过了 5% 的显著性检验，并且莫兰指数均为正值，但整体较低，这表示中国新能源汽车的专利在城市间存在较弱的空间集聚现象。相较于 2011—2015 年，2016—2020 年的莫兰指数有所提升，这也反映出随着更多城市参与到新能源汽车的研发中，专利申请的空间集聚现象逐渐凸显。

图 2 进一步说明了专利申请的空间集聚现象具体的空间分布特征。① 与北京市邻近的天津市、保定市和张家口市均为“高-高”聚类地区，但同时也存在唐山市、廊坊市等“低-高”聚类地区。这反映出北京市作为新能源汽车研发的核心城市，对其邻近城市具有一定的知识溢出效应，但其溢出具有较为明显的指向性——虽然部分城市对于北京市地理邻近，但北

表3　2011—2020年中国新能源汽车各城市专利全局莫兰指数

Table 3　Global Moran’s Index of China’s new energy automobile patents from 2011 to 2020

指数	2011—2015 年	2016—2020 年
莫兰指数	0.056	0.094
期望指数	−0.003	−0.003
方差	0.000	0.000
z 得分	4.301	6.276
p 值	0.000	0.000

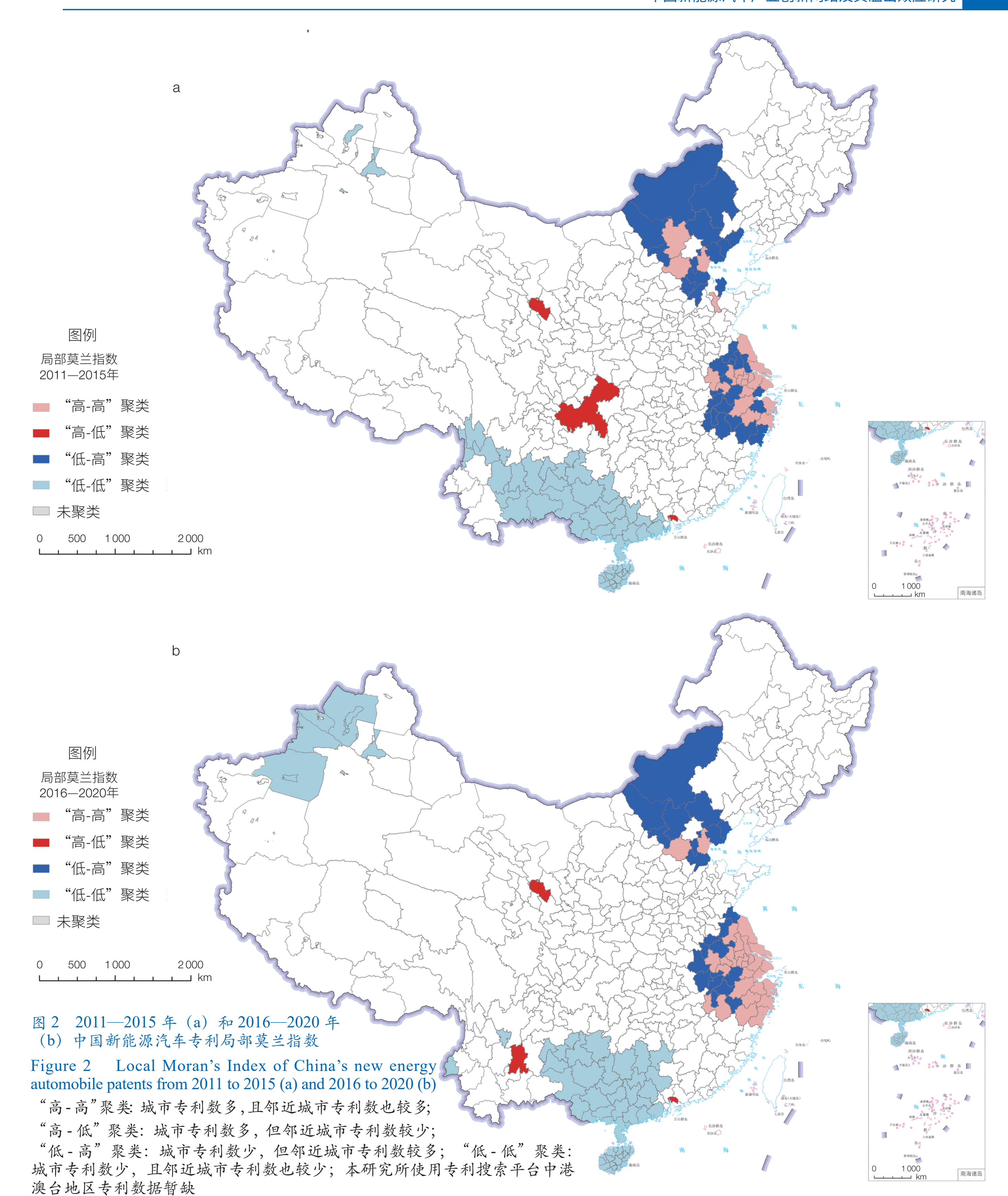


图 2 2011—2015 年（a）和 2016—2020 年（b）中国新能源汽车专利局部莫兰指数

Figure 2 Local Moran's Index of China's new energy automobile patents from 2011 to 2015 (a) and 2016 to 2020 (b)

“高-高”聚类：城市专利数多，且邻近城市专利数也较多；“高-低”聚类：城市专利数多，但邻近城市专利数较少；“低-高”聚类：城市专利数少，但邻近城市专利数较多；“低-低”聚类：城市专利数少，且邻近城市专利数也较少；本研究所使用专利搜索平台中港澳台地区专利数据暂缺

“High-high” clustering: there are many patents both in city and its nearby cities; “high-low” clustering: a number of patents are located in city, but a few of them are located in nearby cities; “low-high” clustering: a few of patents are located in city, but a number of patents are located in nearby cities; “low-low” clustering: there are a few of patents both in city and its nearby cities; Due to lack of data, Hong Kong SAR, Macao SAR, and Taiwan Province of China are not included in this study

京市知识溢出并没有对其产生较为明显的影响。② 在长江三角洲城市群地区具有显著新能源汽车专利空间集聚现象，以上海市、南京市、杭州市和宁波市等为代表的城市形成了"高-高"聚类的连片区。同时，比较2011—2015年和2016—2020年的局部莫兰指数空间格局可以发现，在2011—2015年，属于"高-高"聚类的城市外围存在大量属于"低-高"聚类的城市，主要分布于浙江省南部、江苏省北部和安徽省东部；而随着新能源汽车产业的发展，这些城市逐渐从"低-高"聚类转变为"高-高"聚类，"低-高"聚类区进一步向外围延伸，这表现出显著的依托地理邻近性的知识溢出效应。③ 广东省西部、广西壮族自治区和云南省存在连片的"低-低"聚类区。这3个省份均拥有一定的汽车制造业基础，但涉及新能源汽车的企业相对较少。尽管广东省拥有比亚迪等重要新能源汽车企业，但其知识溢出也仅局限于粤港澳大湾区，难以产生较为明显的地理邻近上的知识溢出。

2.3 溢出效应的显著性分析

根据莫兰指数结果可知，中国新能源汽车产业可能存在一定的溢出效应。因此，本研究进一步利用空间杜宾模型对中国新能源汽车产业的空间溢出效应进行测度。现有研究指出，显性知识与隐性知识拥有不同的传播方式：隐性知识通常以非正式传播方式进行传播，其传播距离限制较强，而显性知识更容易以多种方式实现跨地区的传播，二者互为补充。此外，多维邻近性也强调了在地理邻近外，也存在诸多其他邻近性。因此，在模型构建时，本研究以各城市专利数量作为被解释变量，城市人均国内生产总值（GDP）、规模以上工业企业R&D资金投入和科学技术支出等10项指标作为解释变量；在设置网络邻接矩阵的基础上，同时分别设置了城市空间距离矩阵和空间邻接矩阵作为对照，来衡量城市间空间邻近关系、空间距离关系与网络邻近关系对新能源汽车产业溢出效应的影响（详见附录2）。

基于不同空间矩阵的中国新能源汽车产业空间溢出效应结果（详见附录2）表示：① 中国新能源汽车产业的创新发展整体上并未形成向邻近城市的溢出效应。在基于城市距离关系和邻接关系的溢出效应中，空间自回归系数（*rho*）均不显著，这表示2011—2020年中国新能源汽车产业的创新活动并没有在全国尺度上形成显著的城市向邻近城市溢出的情况。② 中国新能源汽车产业的创新发展存在一定的网络溢出效应。网络溢出效应的*rho*在1%水平下显著且为正，表示2011—2020年中国新能源汽车产业的创新活动在城市网络中具有一定的正向溢出。③ 企业的R&D投入在推动新能源汽车产业的创新发展中发挥了重要的促进作用。在主效应中，规模以上工业企业R&D经费内部支出同新能源汽车专利数量呈显著的正相关，而在进一步的效应分解中，市域内规模以上工业企业R&D经费内部支出在直接效应中仍同新能源汽车产业专利数量呈显著的正相关，但间接效应并不相关。这表示企业在当地R&D经费投入虽然对当地的新能源汽车创新活动有一定的促进作用，但也未产生显著的溢出效应。

因此，由上述分析可知，新能源汽车企业是当前中国进行新能源汽车创新活动的主体。但一方面中国新能源汽车产业发展仍处于初期，并未形成相对健全的产业体系；另一方面则是新能源汽车的研发有较高的技术门槛，企业间的合作难以开展。中国新能源汽车产业创新网络的结网比例及其下降趋势也表示，大部分新能源汽车的研发基本由企业独立完成。这使得中国新能源汽车在2011—2020年并未产生显著的溢出效应，仅在长江三角洲城市群地区有一定的创新活动的集聚现象。

3 结论与建议

3.1 结论

本研究以中国新能源汽车产业的创新活动为研究

对象，利用新能源汽车产业的合作专利数据构建了中国新能源汽车产业的城市合作矩阵，识别了其创新网络的结构及演化过程。在此基础上，运用空间杜宾模型计算了中国新能源汽车产业创新活动的网络溢出效应，并与基于城市距离关系和邻近关系的溢出效应进行对比，得出3点具体结论。

（1）2011—2020年，中国新能源汽车产业的创新活动已初具规模，并形成了一定规模的创新网络；但相对于新能源汽车产业整体上的创新活动，城市、企业间的创新合作相对较少，合作关系并不密切，创新网络仍处于发展初期。

（2）城市在参与新能源汽车产业创新网络的过程中，城市的规模优势和等级优势显著。规模较大的省会城市和首府城市拥有更多的企业及政策优势来吸引其他企业或科研机构开展新能源汽车的研发活动，并推动邻近城市共同参与到相关研发活动中。

（3）企业的R&D投入是推动当地新能源汽车产业创新发展的核心动力，但其作用尺度在当前阶段主要表现在城市内部。尽管新能源汽车产业的创新发展在长江三角洲城市群地区出现了一定的空间集聚现象，但整体上，在城市的地理邻近和网络邻近关系上均未产生显著的溢出效应。

3.2 建议

（1）持续实施针对新能源汽车产业创新研发的补贴政策，推动新能源汽车产业内更广泛的企业与企业、企业与高校和科研机构之间的合作。政府在制定新能源汽车企业的优惠政策时，除减少、免除相关税收外，更需要实施有利于企业开展技术研发的相关政策，以推动当地新能源汽车产业产学研一体化，鼓励当地企业与高校和科研机构以及其他拥有技术互补的企业开展合作。同时，在不同空间层级（如省域内、都市圈、城市群等）上制定有利于城市间开展研发合作的相关政策，降低在不同城市的企业合作过程中由行政边界造成的合作壁垒，推动新能源汽车产业创新网络的发展。

（2）根据不同地区新能源汽车产业的发展阶段、创新资源禀赋与区位条件，针对性地完善新能源汽车产业链与知识链的建设，并发挥创新网络中核心节点城市的带动作用，推动新能源汽车产业创新在区域中的网络化发展。就具体城市与区域而言：① 持续发挥北京市科研资源优势，加大对清华大学、北京理工大学等具有新能源汽车研发实力的高校，以及中国科学院微电子研究所、中国科学院电工研究所等科研机构的研发经费投入，并鼓励科研机构同当地及邻近城市的新能源汽车企业开展研发合作。② 发挥长江三角洲城市群企业产业链相对完善、合作密切的优势，适当减少不同城市、省份之间企业合作的政策限制，推动长江三角洲城市群新能源汽车产业创新网络的发展。③ 粤港澳大湾区拥有比亚迪、小鹏、广汽埃安等众多新能源汽车品牌，其产业链上游关键零部件的生产、研发工作在该地区各城市均有分布，但企业间缺少产业链上的合作。在未来的新能源汽车产业发展中，应鼓励不同城市间的上下游企业开展合作，实现上下游产业的有效结合。④ 中西部地区一方面应利用当地地租、人力等资源优势，吸引东部地区新能源汽车企业的投资，并同其他新能源汽车企业共同开展相关研发活动，参与到新能源汽车产业创新网络中；另一方面则应发挥中西部地区长安等新能源汽车品牌的资源优势，逐步带动中西部地区的新能源汽车产业进行创新发展。

参考文献

1 Dicken P. Global Shift: Mapping the Hanging Contours of the World Economy (7th ed). New York: The Guilford Press, 2015.

2 Kimble C, Wang H. China's new energy vehicles: Value and innovation. Journal of Business Strategy, 2013, 34(2): 13-20.

3 余谦, 白梦平, 覃一冬. 多维邻近性能促进中国新能源汽车企业的合作创新吗?. 研究与发展管理, 2018, 30(6): 67-74. Yu Q, Bai M P, Qin Y D. Does multi-dimensional proximity

promote innovation cooperation between new energy automobile enterprises in China?. R&D Management, 2018, 30(6): 67-74. (in Chinese)

4 张凯煌, 千庆兰, 陈清怡. 多尺度视角下中国新能源汽车产业创新空间格局及网络特征. 地理科学进展, 2021, 40(11): 1824-1838.
Zhang K H, Qian Q L, Chen Q Y. Multi-level spatial patterns and network characteristics of China's new energy vehicle industrial technological innovation. Progress in Geography, 2021, 40(11): 1824-1838. (in Chinese)

5 Carlino G, Kerr W R. Agglomeration and innovation// Duranton G, Henderson J V, Strange W. Handbook of Regional and Urban Economics, Vol 5. Amsterdam: Elsevier, 2015: 349-404.

6 Castells M. The Rise of the Network Society. Oxford: Blackwell, 1996.

7 Capello R. The city network paradigm: Measuring urban network externalities. Urban Studies, 2000, 37(11): 1925-1945.

8 张凯煌, 千庆兰. 中国新能源汽车产业创新网络特征及其多维邻近性成因. 地理研究, 2021, 40(8): 2170-2187.
Zhang K H, Qian Q L. Characteristics and proximities mechanism of China's new energy vehicle industry innovation network. Geographical Research, 2021, 40(8): 2170-2187. (in Chinese)

9 苏屹, 曹铮. 新能源汽车协同创新网络结构及影响因素研究. 科学学研究, 2022, 40(6): 1128-1142.
Su Y, Cao Z. Structure and influencing factors of cooperative innovation network for new energy automobile. Studies in Science of Science, 2022, 40(6): 1128-1142. (in Chinese)

10 Glaeser E L, Kallal H D, Scheinkman J A, et al. Growth in cities. Journal of Political Economy, 1992, 100(6): 1126-1152.

11 姚常成, 吴康. 集聚外部性、网络外部性与城市创新发展. 地理研究, 2022, 41(9): 2330-2349.
Yao C C, Wu K. Agglomeration externalities, network externalities and urban innovation development. Geographical Research, 2022, 41(9): 2330-2349. (in Chinese)

12 Meng X X, Liu M L, Wang J. Innovation network economic model of new energy automobile industry based on social network perspective. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2021, 144(5): 1671-1680.

13 Ter Wal A L J. The dynamics of the inventor network in German biotechnology: Geographic proximity versus triadic closure. Journal of Economic Geography, 2014, 14(3): 589-620.

Study on Innovation Networks and Its Spillover Effect of China's New Energy Automobile Industry

XIONG Zhifei[1] ZHANG Wenzhong[1,2,3*]

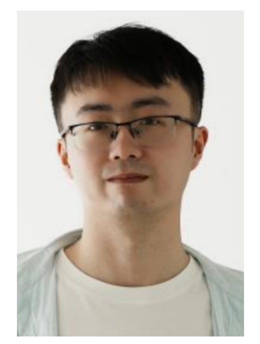
(1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2 CAS Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Beijing 100101, China;
3 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The network spillover effect of knowledge has been playing an increasingly significant role in the development of industrial innovation. The urban cooperation matrix of China's new energy automobile industry is built based on new energy automobile patent data, and the structure and evolution process of China's new energy automobile industry are depicted. On this basis, the spatial Dubin model (SDM) is used to calculate the network spillover effect, and its results are compared with the results of spillover effect based on the relationship of spatial contiguity and distance of cities. The results show that the innovation activities of China's new energy automobile industry have begun to take shape, and a certain scale of innovation network has been formed. However, the innovation cooperation among cities and enterprises is not close. The innovation activities of new energy automobile industry are mainly concentrated in large cities, and from such cities, the innovation

*Corresponding author

activities have strongly radiation to surrounding regions. The R&D investment of enterprises plays the key role in promoting the innovation and development of the local new energy automobile industry, but it has not produced significant spillover effect on the countrywide scale.

Keywords new energy automobile industry, innovation networks, spillover effect, Spatial Dubin Model (SDM)



熊志飞 中国科学院地理科学与资源研究所博士研究生。主要研究方向为城市网络、生产网络、城市人居环境等。E-mail: xiongzhifei2019@igsnrr.ac.cn

XIONG Zhifei Doctor candidate of Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences (CAS). His main research fields cover city networks, production networks and urban living environment. E-mail: xiongzhifei2019@igsnrr.ac.cn



张文忠 中国科学院地理科学与资源研究所研究员。中国发展战略学研究会副理事长。主要从事经济区位论、宜居城市、资源型城市、产业与区域发展等方面的研究。先后主持了国家自然科学基金重点项目和面上项目，以及有关部委的各类研究课题50余项，发表论文200多篇。获得北京市科学技术奖二等奖、中国科学院杰出科技成就奖、中国科学院科技促进发展奖、环境保护科学技术奖一等奖等多项奖项。E-mail: zhangwz@igsnrr.ac.cn

ZHANG Wenzhong Doctor, Researcher at the Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences (CAS). He is also serving as Vice Chairman of Chinese Association of Development Strategy Studies. He has long been engaged in research of economic location theory, livable cities, transformation of resources cities, industry and regional development, etc. He has successively hosted or co-hosted more than 50 research projects sponsored by the National Natural Science Foundation of China and other ministries. He has published more than 200 papers in academic journals such as *Science of the Total Environment, Applied Energy*. He has been awarded the second prize of Beijing Science and Technology Award, the Outstanding Scientific and Technological Achievement Award of CAS, the Science and Technology Promotion Development Award of CAS, the first prize of Science and Technology for Environmental Protection, and so on.
E-mail: zhangwz@igsnrr.ac.cn

附录1 社会网络分析方法

1.1 网络节点指标

（1）节点中心度（$C_{D(n_i)}$）。用以反映网络中某一节点相对于其他节点的集中程度。

$$C_{D(n_i)} = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} 。 \quad (1)$$

其中，a_{ij} 表示网络中的节点 i 与 j 间是否存在合作联系，存在记为1，不存在则记为0。n 为节点数，即存在有效专利的城市数量。

（2）接近中心度（$C_{C(n_i)}$）。用以反映网络中某一节点在网络中的中心位置。

$$C_{C(n_i)} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{n} \mathrm{d}(n_i, n_j)} 。 \quad (2)$$

其中，$\mathrm{d}(n_i, n_j)$ 表示节点 i 和 j 之间的最近距离。

（3）中介中心度（$C_{B(n_i)}$）。用以衡量节点对其他节点的控制、依赖以及作为中介的程度。

$$C_{B(n_i)} = \sum_{j}^{n} \sum_{k}^{n} \frac{g_{jk}(n_i)}{g_{jk}}, j \neq k \neq i 。 \quad (3)$$

其中，g_{jk} 表示从节点 j 到节点 k 的边数，g_{jk} 表示从节点 j 到节点 k 经过节点 i 的边数。

1.2 网络整体指标

（1）结网比例（N）。用来反映合作专利数量占全部专利数量的比例。

$$N=\frac{\mathrm{sum}(n)}{\mathrm{sum}(p)}。\tag{4}$$

其中，N 表示结网比例，n 表示合作专利数量，p 表示总专利数量。

（2）平均度（$\bar{d}$）。指网络中所有节点的度加总后计算得到的平均值，可以反映出网络中所有节点平均拥有的合作伙伴数量。

$$\bar{d}=\frac{2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}a_{ij}}{n}。\tag{5}$$

（3）网络密度（D）。用以刻画网络中各个节点所建立的联系复杂程度。

$$D=\frac{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}a_{ij}}{n(n-1)}。\tag{6}$$

（4）平均距离（L）。用以反映网络中节点之间的邻近程度。

$$L=\frac{2\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}d(n_i,n_j)}{n(n-1)}。\tag{7}$$

（5）平均聚类系数（C）。用以反映网络中与同一节点相连的两个节点间建立联系的平均概率，该指标的数值越大意味着相邻的节点间越容易建立起合作关系。

$$C=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}。\tag{8}$$

其中，k_i 表示节点 i 邻接节点数据，E_i 表示节点 i 与邻接节点形成的实际边数。

附录 2　空间溢出模型及其回归结果

本研究基于空间杜宾模型，设置了城市空间距离矩阵、空间邻接矩阵和网络邻接矩阵 3 种空间矩阵，分别强调了溢出效应随距离增加而递减、溢出效应仅存在于邻接城市间以及溢出效应随城市间合作关系强度降低而递减的 3 种关系。具体模型如下：

$$y_{it}=\rho_D\sum_{j}^{n}W_D y_{jt}+\beta x_{it}+\sum_{j}^{n}\theta W_D x_{jt}+\mu_i+\phi_i+\varepsilon_{it}；\tag{9}$$

$$y_{it}=\rho_G\sum_{j}^{n}W_G y_{jt}+\beta x_{it}+\sum_{j}^{n}\theta W_G x_{jt}+\mu_i+\phi_i+\varepsilon_{it}；\tag{10}$$

$$y_{it}=\rho_N\sum_{j}^{n}W_N y_{jt}+\beta x_{it}+\sum_{j}^{n}\theta W_N x_{jt}+\mu_i+\phi_i+\varepsilon_{it}。\tag{11}$$

其中，y_{it} 是被解释变量，表示 i 城市在 t 时间阶段内新能源汽车产业专利总数；ρ_D、ρ_G 和 ρ_N 是回归系数；W_D 为距离矩阵，根据城市间的空间距离的倒数赋予权重；W_G 为邻接矩阵，城市邻接时记为 1，否则记为 0；W_N 为网络矩阵，城市间存在专利合作时记为 1，否则记为 0，并根据城市间专利合作数量赋予权重；x_{jt} 为城市 i 在 t 时间阶段内各解释变量。β 是解释变量的弹性系数；θ 是解释变量空间滞后项弹性系数；μ_i 表示个体固定效应；Φ_i 表示时间固定应；ε_{it} 是随机误差项。

本研究选取人均 GDP 衡量城市经济水平、规模以上工业企业 R&D 资金投入衡量企业对新能源汽车产业创新活动的影响强度，地方一般公共预算收支中的科学技术支出和教育支出衡量政府对新能源汽车产业创新活动的影响强度，年末金融机构存贷款余额占 GDP 比值来衡量城市金融发展水平，外商直接投资来衡量城市对外开放程度，第二产业从业人数占全社会从业人数比值来衡量城市的产业结构，人均道路面积来衡量城市的通达程度，同时对解释变量与被解释变量加 1 再取对数。

数据来源于历年中国城市统计年鉴、各省份统计年鉴、各城市统计年鉴、国民经济和社会发展统计公报和中国火炬统计年鉴等。需要指出的是，拉萨市、西宁市和金华市并没有对规模以上工业企业 R&D 资金投入进行统计；考虑到以上城市专利数据相对较少，因此并未将其参与溢出效应的计算。空间溢出模型回归结果见附表 1。

附表 1　基于不同空间矩阵的新能源汽车产业专利数据的空间杜宾模型回归结果

Attached Table 1　Results of SDM based on China's new energy automobile patents in spatial distance, spatial contiguity and network distance matrix

相关指标	距离矩阵		邻接矩阵		网络矩阵	
	相关系数	标准差	相关系数	标准差	相关系数	标准差
解释变量						
人均GDP	0.19	0.64	−0.22	0.72	−0.22	0.16
规模以上工业企业R&D资金投入	0.01	0.04	−0.01	0.04	0.49***	0.18
科学技术支出	0.02	0.15	−0.04	0.14	0.00	0.15
教育支出	−0.59***	0.21	−0.50**	0.21	0.00	0.18
年末金融机构存贷款余额占国内生产总值比值	0.82	0.67	0.79	0.68	0.17	0.17
外商直接投资	−0.39***	0.10	−0.35***	0.10	−0.04	0.06
第二产业从业人数占全社会从业人数比值	0.90**	0.38	0.96***	0.35	−0.07	0.28
人均道路面积	−0.30*	0.16	−0.09	0.17	0.03	0.12
设置空间权重的解释变量						
人均GDP	10.77***	3.67	2.27**	0.90	0.42	0.51
规模以上工业企业R&D资金投入	0.39	0.41	0.07	0.05	0.40	0.80
科学技术支出	−1.05	0.72	−0.22	0.21	−0.83	0.60
教育支出	3.30	3.28	0.33	0.27	0.89*	0.51
年末金融机构存贷款余额占国内生产总值比值	−16.12***	4.72	−1.48**	0.61	−0.38	0.38
外商直接投资	0.36	1.05	−0.01	0.16	−0.34***	0.10
第二产业从业人数占全社会从业人数比值	1.29	2.92	−0.46	0.43	−1.28**	0.57
人均道路面积	−2.13	1.36	−0.09	0.18	1.52***	0.35
被解释变量的空间效应	−0.26	0.39	0.11	0.09	0.45***	0.16
直接效应						
人均GDP	0.20	0.61	−0.04	0.67	−0.18	0.17
规模以上工业企业R&D资金投入	0.01	0.05	0.00	0.04	0.55***	0.20
科学技术支出	0.02	0.14	−0.06	0.14	−0.06	0.17
教育支出	−0.60***	0.21	−0.48**	0.20	0.05	0.18
年末金融机构存贷款余额占国内生产总值比值	0.88	0.64	0.69	0.64	0.15	0.17
外商直接投资	−0.39***	0.11	−0.35***	0.10	−0.06	0.07
第二产业从业人数占全社会从业人数比值	0.90**	0.38	0.94***	0.36	−0.16	0.29
人均道路面积	−0.30*	0.16	−0.10	0.16	0.12	0.15

（续附表1）

相关指标	距离矩阵		邻接矩阵		网络矩阵	
	相关系数	标准差	相关系数	标准差	相关系数	标准差
间接效应						
人均GDP	10.19	8.35	2.04***	0.71	0.64	1.07
规模以上工业企业R&D资金投入	0.45	0.84	0.07	0.05	1.45	1.83
科学技术支出	−0.94	0.91	−0.20	0.19	−1.86	1.95
教育支出	3.25	5.15	0.27	0.27	1.83	1.96
年末金融机构存贷款余额占国内生产总值比值	−15.24	11.54	−1.31**	0.52	−0.53	0.83
外商直接投资	0.44	1.55	−0.04	0.15	−0.76	0.94
第二产业从业人数占全社会从业人数比值	1.20	4.14	−0.34	0.40	−2.70	2.19
人均道路面积	−2.10	2.24	−0.09	0.17	3.20	3.52
总效应						
人均GDP	10.39	8.27	2.00***	0.67	0.46	1.16
规模以上工业企业R&D资金投入	0.46	0.85	0.07	0.07	2.00	1.93
科学技术支出	−0.92	0.91	−0.26	0.26	−1.92	2.03
教育支出	2.64	5.19	−0.22	0.36	1.88	2.01
年末金融机构存贷款余额占国内生产总值比值	−14.35	11.56	−0.61	0.78	−0.38	0.89
外商直接投资	0.05	1.56	−0.39**	0.19	−0.82	0.97
第二产业从业人数占全社会从业人数比值	2.10	4.30	0.60	0.58	−2.86	2.23
人均道路面积	−2.40	2.26	−0.19	0.22	3.32	3.61

*p<0.1，**p<0.05，***p<0.01

■责任编辑：岳凌生